京都工芸繊維大学

氏　　名	ちょう　しろ ZHANG ZILU
学位(専攻分野)	博　士（工学）
学位記番号	博甲第 1104 号
学位授与の日付	令和 5 年 9 月 25 日
学位授与の要件	学位規則第 4 条第 1 項該当
研究科・専攻	工芸科学研究科　建築学専攻
学位論文題目	**圧延溝形鋼を用いた組立梁の挙動と変形性能に関する研究**
審査委員	(主査)教授　金尾　伊織 教授　満田　衛資 准教授　村本　真 助教　小島　紘太郎

論文内容の要旨

近年、鋼構造の建設が急速に広がっている中国では、未熟である技術的問題を解決する方法として、組立式鋼構造建築の研究が盛んに進められている。本論文は、申請者がすでに提案している圧延溝形鋼を組み合わせた組立梁について、その挙動を明確にし、性能を発揮するための条件、床スラブの影響について、実験的、解析的に明らかにしている。

論文は、組立梁の挙動を精度よく予測するための数値解析モデルの構築、その解析モデルを用いた組立梁の性能検証のための数値解析からなり、全６章で構成されている。

第１章では、研究の目的と背景、既往の研究および論文の構成が記されている。技術が低い国での問題点、課題を述べ、組立式鋼構造建築に関する研究の状況を示し、重量鉄骨による組立式鋼構造建築の必要性を示している。

第２章では、圧延溝形鋼を背中合わせにボルトで接合した圧延溝形鋼組立梁の実験を行い、有限要素解析モデルを構築している。ボルトの初期張力、各部材間の摩擦を考慮した詳細な解析モデルを提案し、実験結果を精度よく追跡できることを示している。また、数値解析によって、実験では測定が難しいボルト応力や破壊までの梁の状態を確認している。

第３章では、２章で提案した有限要素解析モデルを用いて、鉛直荷重と単調逆対称曲げを受ける圧延形鋼組立梁の数値解析を実施し、背中合わせの２つの溝形鋼で形成される梁を、1 つの H 形鋼と同等の耐力を発揮できる接合条件および横補剛条件を提案している。組立梁であるため、離間現象が発生し、その離間距離が大きいと耐力が低下すると共にボルト張力が大きくなるメカニズムを解明している。さらに、ボルトの配置によって、梁の過剰な応力上昇や溝形鋼の離間を誘発することも示している。

第４章では、繰返し載荷を受ける圧延溝形鋼を用いた組立梁の挙動を明らかにし、繰返し載荷時にも十分な性能を発揮するための条件を示している。ここでは、比較的変形が大きい履歴１と履歴１よりも変形が小さい履歴２を対象としている。載荷履歴の違いは、ボルト配置に与える影響は小さいが、横座屈による面外変形に大きな影響を与えることを確認している。履歴１の方が梁端の面外変形が顕著となるため、端部を拘束する方法が有効であることを示し、具体的な補剛

方法を提案している。

第５章では、床スラブが組立梁の耐力と変形性能に与える補剛効果について検討している。有限要素解析モデルでは、床スラブと梁を繋げるスタッドをばねで詳細にモデル化することで、床スラブの補剛効果の低減を評価できる解析モデルを示しており、床スラブ付き梁の実験を精度よく模擬できることを確認している。さらに、４章までに提案した接合方法を適用した圧延溝形鋼組立梁に床スラブを取り付け、繰返し載荷を受ける数値解析を行い、スラブによって耐力および塑性変形能力が向上することを示している。また、梁の有効座屈長さを $l_k=0.5l$ と評価することで、一般の H 形鋼梁と同様に塑性能力評価が可能であることを示している。

第６章では、本研究で得られた結果について述べている。

論文審査の結果の要旨

中国では鉄筋コンクリート構造の建物が最も多いが、建物の高層化に伴い、鋼構造が急速に広がっている。しかし、中国における鋼構造の製作や建設に関する技術は十分とは言い難い。この技術的問題を解決する方法として、中国では組立式鋼構造建築の研究が盛んに進められている。このような背景を受け、本論文では、申請者がすでに提案している圧延溝形鋼を背中合わせに組み合わせた組立梁の挙動を明確にし、保有性能を発揮するための条件、床スラブの影響について、実験的、解析的に明らかにしている。

本研究では、まず、組立梁の数値解析モデルを構築する目的で、圧延溝形鋼組立梁の実験を行っている。詳細な有限要素解析モデルを構築するため、複数の歪データおよび非接触変位計測システムを用いた梁の 3 次元変形を計測し、これらのデータを精度よく予測できる部材間の摩擦やボルト張力を詳細に考慮した有限要素解析モデルを構築している。

構築した高精度な数値解析モデルを用いて、圧延溝形鋼組立梁の挙動、性能を十分に発揮できるための接合条件を検討している。数値解析を多数実施し、圧延溝形鋼組立梁は、曲げを受けて背中合わせに接合された圧延溝形鋼がお互いに離れようとし（離間）、その結果、接合しているボルトに大きな張力が発生するというメカニズムを解明した。通常の鋼構造建物では、H 形鋼を用いるため部材の座屈にのみ着目されるが、組立梁は、座屈に加えて部材の離間が耐力低下や顕著な面外変形の発生に繋がることを示している。また、数値解析によって挙動特性を明らかにしたことで、溝形鋼の離間を抑制することが部材性能を発揮するための条件となること、そのためには高力ボルトの張力にも注意が必要であること、ボルト張力、離間距離を抑えるためには、梁端部からのボルト位置と材軸方向へのボルトピッチが重要であることを明らかにしている。これらの条件を満足する接合方法として、梁端部からのボルト位置は梁成の 1～1.5 倍、材軸方向へのボルトピッチは梁成の 3 倍以下にすれば極度の離間を防げること、面外変形を抑制するため、梁幅の 10 倍以下の間隔で横補する横補剛方法を提案している。

さらに、床スラブの影響についても解析的に検討している。床スラブの拘束効果によって、変形性能が著しく向上することを示している。塑性変形能力評価指標 Λ_c を用いてスラブ付き組立梁の塑性変形倍率 R、最大塑性変形角 θ_{pmax}、累積塑性変形角 $\Sigma\theta_p$ について整理することで、スラブ付き梁の有効座屈長さを梁長さの半分として評価することで、通常の H 形鋼梁と同様に変形性能を評価できることを示している。この知見は、組立梁だけでなく、一般のスラブ付き H 形鋼梁にも

応用できる可能性があり、極めて大きな成果であると言える。

本論文は、今後活用が見込まれる組立式鋼構造建築において、通常の鋼構造とは異なる挙動を示すため接合条件が特殊であり、その注意すべき点と接合条件を具体的に明示したことは、組立式鋼構造建築の構造設計において極めて有意義な成果と言える。また、この組立式鋼構造建築の技術は、中国と同様の課題をもつ国々においても有効な研究成果であることから、今後の発展が期待できる研究である。

本論文は，審査を経た以下の 2 編の論文にその内容が発表されている。

[1] 張子露，金尾伊織，郁有升，李軍: 鉛直荷重と逆対称曲げを受ける圧延溝形鋼を用いた組立梁の設計条件，日本建築学会構造工学論文集, Vol. 68B, pp. 243-251, 2022.3

[2] 張子露，金尾伊織，李軍: 繰返し載荷を受ける圧延溝形鋼を用いた組立梁の挙動，日本建築学会構造系論文集，第 88 巻，第 806 号, pp. 666-674, 2023.4